

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ЧАСТОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Интерес к электромагнитному излучению (ЭМИ), сопровождающему наряду с акустической эмиссией трещинообразование горных пород, связан с его информативностью и широкими перспективами практического использования для контроля и прогноза процесса трещинообразования и разрушения (землетрясения, горные удары и другие динамические проявления) массива горных пород [1, 2].

Основные параметры, по которым судят о критической ситуации, — это количество импульсов, их амплитуда, частота [3, 4], распределение по уровням энергии излучения, в последнее время — спектральные характеристики излучения трещин и их изменение, а также изменение частоты, соответствующей максимуму спектральной плотности сигнала [5]. В [5, 6] показано, что это изменение можно представить в виде трех стадий. На первой стадии накопления дефектов диапазон соответствует высоким частотам, на второй по мере роста нагрузки он смещается в область более низких частот, а на третьей вновь отвечает высоким частотам с последующими флуктуациями во всем частотном диапазоне.

Такое изменение максимальной спектральной составляющей сигнала удовлетворительно описывается *S*-образной кривой, построенной по линии максимальных спектральных составляющих. Появление второго высокочастотного максимума этой кривой будет прогнозным признаком нарушения сплошности горной породы.

В [7] показано, что величина, соответствующая наибольшей из максимальных спектральных амплитуд, находится в вершине линии этих амплитуд.

Цель настоящей работы — анализ последовательности перемещения максимальных спектральных составляющих сигнала по спектрально-временной матрице по мере роста нагрузки (времени *t*).

Методика эксперимента [8] включала нагружение цилиндрических образцов в условиях одноосного сжатия. Образцы диаметром 59—46 мм и высотой 70—90 мм изготовлялись из пород и руд Таштагольского железорудного месторождения. Каждый образец устанавливался между плитами прессы с использованием диэлектрических прокладок. Нагружение осуществлялось на стандартном прессе усилием до $5 \cdot 10^2$ кН со скоростью около 100 Н/с, нагрузка постепенно доводилась до разрушающей.

В табл. 1 приведены усредненные механические характеристики пород и руд исследуемых образцов ($\sigma_{сж}$ — прочность на одноосное сжатие, *E* — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона), а также разрушающая нагрузка *P*, зафиксированная при нагружении образцов.

В процессе описываемых испытаний использовалось по несколько образцов каждой разновидности породы. Ошибка при определении механических параметров, указанных в табл. 1, составляла в среднем 15 %.

В процессе нагружения регистрировались прилагаемое усилие известным методом тензометрии, а также процесс возникновения и роста микротрещин и трещин методом регистрации электромагнитного излучения с использованием датчиков ЭМИ — магнитных стержневых и тороидальных узконаправленных антенн, размещаемых вблизи нагружаемого образца на расстоянии около 0,02 м.

Таблица 1

Номер образца	Наименование материала образца	$\sigma_{сж}$, МПа	$E \cdot 10^{-6}$, МПа	ν	P , кН
1	Мраморизованный известняк	67—109	0,36	0,23	$3 \cdot 10^2$
2	Магнетитовая руда	77—250	0,87	0,28	$1,5 \cdot 10^2$
3	Сиенит 1	49—135	0,59	0,25	$2,4 \cdot 10^2$
4	Сиенит 2	49—135	0,59	0,25	$1,4 \cdot 10^2$

Импульсы возникающего в процессе нагружения образцов электромагнитного излучения принимались антеннами и через предварительный усилитель подавались на систему регистрации (в память микроЭВМ).

В процессе экспериментов было замечено, что по мере роста нагрузки на образец наибольшее по амплитуде импульсы ЭМИ возникали в момент разрушения образца. Величины амплитуды зарегистрированных сигналов достигали значений от 20 до 75 мкА/м.

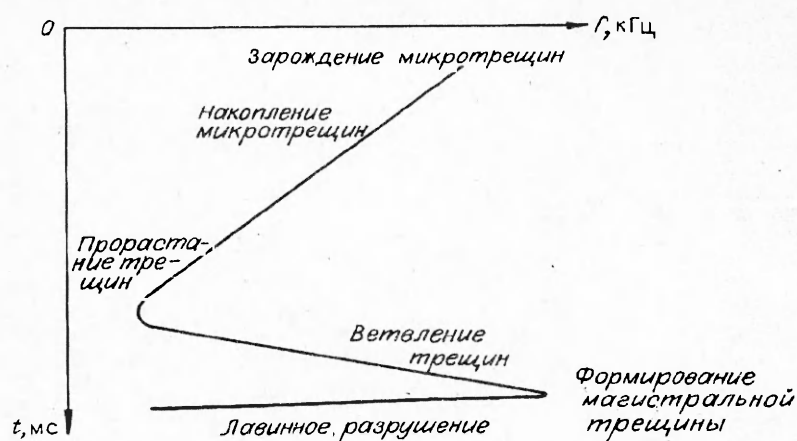
Ниже рассматриваются результаты экспериментов, полученные при нагружении описанных образцов горных пород с регистрацией ЭМИ-излучения по двум каналам с помощью двух различно ориентированных антенн и последующим спектрально-временным анализом сигналов с использованием процедуры БПФ (быстрое преобразование Фурье). Результаты расчетов выдавались в виде матриц спектрально-временных амплитуд, строки которых соответствовали интервалам времени, а столбцы — интервалам частот. Получаемые таблицы — распечатки, охватывающие период времени от начала процесса нагружения до полного разрушения образца (потери сплошности), — в [7] названы спектрально-временными матрицами ЭМИ. Там же было отмечено, что на практике удобно рассмотрение не всей матрицы, а наиболее информативной ее части (усеченной матрицы).

Методика анализа спектрально-временных матриц ЭМИ включала поэтапное выделение величин максимальных спектральных амплитуд и построение по ним линии максимальных спектральных амплитуд.

В качестве примера, иллюстрирующего описанную методику, в табл. 2 приведена часть спектрально-временной матрицы для образца 3 (сиенит-1), полученная для импульсов ЭМИ, зарегистрированных в процессе нагружения образца по описанной схеме. При построении матрицы в ее пределах была выбрана максимальная амплитуда $A = 1000$. Спектральные амплитуды во всех остальных точках матрицы вычислялись в долях от максимальной амплитуды.

Таблица 2

t , мс	$f \cdot 10^{-2}$, кГц																	
	25	29	33	38	42	50	57	65	74	85	98	112	128	147	168	192	220	252
	A , отн. ед.																	
17,00	683	726	729	744	784	801	789	778	740	670	585	494	344	250	240	457	435	400
17,78	691	737	741	762	803	839	829	820	816	763	704	643	525	269	162	427	427	435
18,86	699	748	753	782	838	861	874	866	868	839	809	749	627	554	480	347	365	
19,93	704	755	761	795	855	881	900	920	939	923	900	882	830	810	704	516	524	
20,95	708	761	766	804	868	825	919	943	966	981	981	978	972	963	949	919	863	849
21,75	709	762	767	807	872	899	924	949	976	996	998	996	993	998	993	980	967	961
21,90	709	763	766	807	872	899	926	950	977	991	999	998	993	1000	995	982	973	960
22,03	709	763	766	807	872	899	924	949	977	998	999	996	994	999	995	982	976	966
22,38	709	763	766	807	872	898	923	947	976	997	997	991	984	993	987	972	968	949
23,26	698	751	742	785	840	855	865	870	892	882	838	747	599	614	519	473	499	411
25,82	694	745	732	777	826	836	840	821	842	831	759	637	400	458	409	360	438	291
25,03	691	742	725	772	818	826	826	819	818	803	721	574	399	405	366	311	447	273
26,98	684	733	711	756	777	779	786	767	752	725	621	411	477	415	233	338	481	
29,52	650	695	645	691	685	654	616	555	508	499	502	444	495	235	152	345	212	331
30,16	640	683	621	671	664	608	562	498	477	470	503	460	475	251	263	247	305	324



Заметим, что в связи с задачей регистрации сигналов ЭМИ на конечной стадии разрушения (нарушения сплошности) и соответствующим загромождением чувствительности приемной аппаратуры процесс зарождения и роста микротрещин на ранних стадиях нагружения не регистрировался.

На матрице построена линия максимальных спектральных амплитуд. При ее построении в каждой i -й строке матрицы выбиралась максимальная по величине спектральная амплитуда A_i . Соответствующие точки последовательно соединялись отрезками прямых. Полученная ступенчатая линия начинается с максимальной спектральной амплитуды $A_1 = 801$ на частоте $f_1 = 0,50$ кГц в первой строке матрицы, затем перемещается вправо в область более высоких частот, проходит через точку с наибольшей из максимальных амплитуд $A = 1000$ на частоте $f = 1,47$ кГц, далее она смещается влево и вниз по матрице, постепенно перемещаясь в область низких частот. Последняя точка этой линии соответствует максимальной спектральной амплитуде $A = 683$ при $f = 0,29$ кГц.

Описанная ступенчатая линия с отчетливо выделяющимся максимумом в координатах $t - f$ характеризует расположение точек с максимальными спектральными амплитудами в пределах спектрально-временной матрицы ЭМИ. Эта линия начинается в области низких частот, затем по мере роста нагрузки на образец смещается в область более высоких частот, при этом наибольшей спектральной амплитуде отвечает повышенная частота, в рассматриваемом случае наиболее высокая среди всех частот. Появление в спектре сигнала наибольшей по величине амплитуды на наиболее высокой частоте соответствует завершающему моменту формирования в нагружаемом образце зоны магистральной трещины. В последующие моменты времени при дальнейшем нагружении образца максимальные спектральные амплитуды уменьшаются по величине и смещаются в область пониженных частот. Подобный ступенчатый характер строения линии максимальных спектральных амплитуд был зафиксирован на значительном объеме горных пород.

Рассмотренная структура линии максимальных спектральных амплитуд удовлетворительно согласуется с S-образной характеристикой процесса трещинообразования, описанной в [6], соответствуя нижней ее петле (см. рисунок).

В табл. 2 линия максимальных спектральных амплитуд представлена в виде симметричной ступенчатой линии. Если шаг изменения частоты между столбцами матрицы и интервалы времени между ее строками в пределе устремить к нулю, то такая ломаная линия перейдет в плавную кривую, при этом вершина ее будет иметь вытянутую форму. Характер этой кривой можно рассматривать как экспериментальное подтверждение существования S-образной характеристики, введенной в [6].

Таблица 3

t_p , мс	$\nu \cdot 10^{-2}$, кГц																	
	25	29	33	38	43	50	57	65	74	85	98	112	126	147	168	192	220	252
A , отн. ед.																		
6,51	0	0	703	0	0	0	701	0	0	0	0	0	0	700	700	0	0	0
6,67	0	0	706	0	0	0	706	0	0	0	0	0	0	701	702	0	0	0
11,11	0	726	756	0	724	715	810	826	772	0	766	0	805	815	0	762	746	0
11,27	0	729	757	0	727	719	813	821	778	0	769	0	817	826	0	770	736	0
11,43	0	731	758	0	729	722	835	833	783	0	772	0	832	856	0	782	735	780
13,59	0	752	766	700	746	743	850	858	823	801	764	0	962	990	930	945	965	949
13,65	0	753	767	700	746	743	850	858	823	803	759	0	966	1000	920	941	961	991
13,80	0	754	767	0	746	743	850	856	823	806	754	0	970	999	923	935	954	986
14,45	0	757	767	0	746	739	846	851	817	807	727	0	977	983	872	874	895	936
14,60	0	758	767	0	745	737	845	849	814	806	719	0	977	986	850	850	876	919
18,84	0	746	743	0	0	0	751	0	0	0	0	0	968	0	0	0	0	0
19,05	0	745	742	0	0	0	746	0	0	0	0	0	742	0	0	0	0	0
19,16	0	744	740	0	0	0	742	0	0	0	0	0	725	0	0	0	0	0
19,26	0	742	738	0	0	0	737	0	0	0	0	0	708	0	0	0	0	0

Однако среди исследованных образцов горных пород были и такие, для которых описанная симметрия в строении линии максимальных спектральных амплитуд выполнялась не в полной мере. Рассмотрим особенности структуры линий максимальных спектральных амплитуд для нескольких наиболее характерных образцов горных пород (см. табл. 1). Образец 1 — мраморизованный известняк, диапазон частот до 2,52 кГц, канал регистрации 1; образец 4 — сиенит-2, диапазон частот до 5,04 кГц, канал регистрации 1; образец 2 — магнетитовая руда, диапазон частот до 6,3 кГц, канал регистрации 2.

Отметим, что в описываемых экспериментах регистрация электромагнитного излучения осуществлялась с помощью узконаправленных различно ориентированных антенн магнитного типа, затем информация записывалась на магнитный носитель по каналам 1 и 2. В табл. 3—5 приведены усеченные спектрально-временные матрицы для перечисленных выше образцов горных пород, на которых построены линии максимальных спектральных амплитуд по той же методике, что и в табл. 2. Эти линии, как и приведенная в табл. 2, начинаются в области низких частот, т.е. на стадии нагружения, соответствующей более 0,5 предела прочности, когда начинают возникать сигналы, отвечающие большим амплитудам и низким частотам. Затем при дальнейшем росте нагрузки линии максимальных спектральных амплитуд, так же как и в табл. 2, смещаются в область повышенных частот, проходя через точку, принимающую наибольшие из максимальных значений (в наших обозначениях $A = 1000$), а затем вновь возвращаются в область пониженных частот.

Однако, в отличие от линии максимальных спектральных амплитуд табл. 2, линии, приведенные в табл. 3—5, имеют характерные особенности в строении вершины. Рассмотрим некоторые из них.

Структура линии, изображенной в табл. 3 (образец 1), имеет особенность в строении ее вершины в виде так называемого “выброса” значений спектральных амплитуд в область повышенных частот относительно частоты, на которой регистрируется наибольшая из максимальных амплитуд, причем этот “выброс” по времени предшествует появлению $A = 1000$. После достижения $A = 1000$ линия максимальных спектральных амплитуд переходит в низкочастотную часть спектра.

В табл. 4 (образец 2) линия максимальных спектральных амплитуд также имеет “выброс” в область высоких частот, который предшествует появлению $A = 1000$. Однако после этого линия максимальных спектральных амплитуд не переходит в низкочастотную часть частотного диапазона, а заканчивается на высоких частотах.

Еще одна особенность в строении вершины линии максимальных спектральных амплитуд приведена в табл. 5 (образец 4). Здесь в вершине линии

Таблица 4

t, мс	f · 10 ⁻² , кГц																	
	378	390	401	414	426	439	453	466	481	495	510	526	542	559	576	593	611	630
	A, отн. ед.																	
14,14	763	763	765	765	763	754	741	723	712	704	0	0	0	0	725	771	793	784
14,60	821	823	877	830	830	827	821	813	807	803	800	797	797	805	825	843	845	823
14,75	864	869	875	880	884	887	883	889	879	879	880	882	882	893	901	903	892	859
14,92	895	902	910	916	921	925	927	928	930	933	936	942	947	953	961	947	928	887
15,08	914	922	931	938	944	950	953	956	959	963	969	976	983	987	986	974	950	905
15,24	920	929	938	946	953	959	963	966	969	973	978	987	994	1000	998	985	959	912
15,50	915	924	933	940	947	952	956	958	958	950	964	973	982	996	990	979	954	908
15,56	898	906	915	950	925	930	932	937	928	925	925	934	945	950	953	957	936	893
15,72	859	877	884	886	888	891	892	887	878	855	859	866	883	904	914	921	906	869
15,87	829	837	840	837	835	837	836	826	808	779	758	767	795	831	858	871	866	836
16,03	770	786	784	772	763	765	767	754	722	0	0	0	0	740	785	815	919	798

Таблица 5

t, мс	f · 10 ⁻² , кГц																		
	13	15	19	24	30	35	45	58	71	89	110	137	180	212	263	327	405	504	
	A, отн. ед.																		
6,67	0	0	0	0	0	0	0	0	757	765	0	0	0	0	0	0	733	768	
6,98	0	0	0	0	0	0	0	0	765	793	0	724	0	0	0	0	722	772	857
7,30	0	0	0	0	0	0	0	0	772	801	702	741	0	0	0	0	776	760	815
7,62	0	0	0	0	0	0	0	700	777	806	724	751	0	0	708	820	707	0	
7,94	0	0	0	0	0	0	0	704	781	808	742	768	0	0	752	846	0	835	
8,25	0	0	0	0	0	0	0	707	784	807	754	772	0	0	775	847	0	776	
8,56	0	0	0	0	0	0	0	710	785	804	762	769	0	0	780	815	0	1000	
8,89	0	0	0	0	0	0	0	712	785	798	765	760	0	0	768	748	0	982	
9,20	0	0	0	0	0	0	0	713	784	788	764	748	0	0	741	0	0	901	
9,52	0	0	0	0	0	0	0	714	782	776	758	723	0	0	700	0	0	706	794
9,84	0	0	0	0	0	0	0	714	778	761	740	0	0	0	0	0	0	774	0

максимальных спектральных амплитуд выше значения амплитуды $A = 1000$ имеется "провал" этой линии в область пониженных частот, после чего амплитуда достигает своего максимального значения $A = 1000$, а затем линия сдвигается в область низких частот.

Анализируя изменение спектрального состава ЭМИ-излучения на различных стадиях нагружения в целом, отметим, что на начальной стадии нагружения спектр ЭМИ формируется в высокочастотной части частотного диапазона. Затем по мере роста нагрузки он смещается в низкочастотную часть частотного диапазона, что иллюстрируется в верхней части табл. 2—5. При дальнейшем росте нагрузки происходит повышение доли высокочастотных составляющих в спектре сигнала с одновременным смещением максимальных спектральных амплитуд в область повышенных частот, что иллюстрируется средней частью рисунка и табл. 2—5. В спектре сигнала наряду с низкочастотными составляющими появляются и высокочастотные составляющие с наибольшей из максимальных амплитуд, что свидетельствует о формировании зоны магистральной трещины. При этом вершина на линии максимальных спектральных амплитуд может иметь различную конфигурацию, т.е. быть вытянутой (см. табл. 2), иметь "выбросы" или "провалы" либо вообще после достижения высоких частот не иметь продолжения (см. табл. 4). Наконец, на последней стадии нагружения процесс ЭМИ-излучения сопровождается снижением доли высокочастотных и увеличением доли низкочастотных составляющих сигнала ЭМИ. Заканчивается процесс разрушения образца излучением импульсов ЭМИ, спектр которых, как правило, сосредоточен в области низких частот.

Таким образом, во всех приведенных таблицах огибающая линий максимальных спектральных амплитуд одинакова для всех исследуемых образцов. Огибающая будет иметь вид петли, вытянутой параллельно оси частот с вершиной, расположенной в высокочастотной части частотного диапазона. Такой характер огибающей соответствует нижней части петли S-образной характеристики процесса трещинообразования и разрушения.

Описанные эксперименты и анализ литературных источников [5—7] по изучению ЭМИ при разрушении горных пород позволяют сделать следующие выводы:

— общие изменения в спектральных составляющих ЭМИ-излучения по мере роста нагрузки подчиняются закономерности, заключающейся в последовательном перемещении максимальной спектральной амплитуды из высокочастотной в низкочастотную область, затем опять в высокочастотную и далее обратно в низкочастотную часть спектра;

— линия максимальных спектральных амплитуд, построенная на усеченных матрицах ЭМИ, независимо от строения ее вершины соответствует второй и третьей стадиям S-образной характеристики процесса разрушения [6];

— описанные в настоящей работе эксперименты наряду с литературными данными и их интерпретация в виде последовательного перемещения максимальной спектральной амплитуды по мере роста нагрузки из высокочастотной части частотного диапазона в низкочастотную, затем опять в высокочастотную и после этого обратно в низкочастотную являются экспериментальным подтверждением S-образной характеристики процесса разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 93-05-8642).

ЛИТЕРАТУРА

1. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений. — М.: ИФЗ АН СССР, 1988.
2. Егоров П.В., Иванов В.В., Колпакова Л.А. О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // ФТПРПИ. — 1988. — № 1. — С. 67—70.
3. Афанасенко Г.В., Шведов И.М. Исследование естественных и промышленных электромагнитных полей для прогноза выбросов при разработке карналлита // ФТПРПИ. — 1991. — № 1. — С. 78—83.
4. Фрид Б.И., Шабаров А.Н., Проскураков В.М. и др. Формирование электромагнитного излучения угольного пласта // ФТПРПИ. — 1992. — № 2. — С. 40—42.
5. Касьян М.В., Робсман В.В., Никогосян Г.Н. Изменение спектров эмиссионных сигналов при развитии трещин и разрушении горных пород // ДАН СССР. — 1989. — Т. 306, № 4. — С. 826—830.
6. Курленя М.В., Яковицкий Г.Е., Кулаков Г.И. Стадийность процесса разрушения на основе исследования ЭМИ-излучения // ФТПРПИ. — 1991. — № 1. — С. 44—49.
7. Курленя М.В., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Спектрально-временной анализ ЭМИ-излучения при трещинообразовании образцов горных пород // ФТПРПИ. — 1993. — № 1. — С. 3—13.
8. Гуфельд И.Л., Никифорова Н.Н., Рожной А.А. и др. Характеристика источников электромагнитного излучения в массиве горных пород // Напряженно-деформированное состояние массивов горных пород. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1988. — С. 70—76.

г. Новосибирск

Поступила 12/X 1993 г.,
в окончательном варианте — 28/XII 1993 г.